

Отзыв
официального оппонента
Захарова Виктора Ивановича
на диссертационную работу Александра Дмитрия Валерьевича
«Лазерная интерферометрия на основе частотно-фазовой модуляции для
исследования сейсмических и геоакустических колебаний»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Развитие современных областей прикладной оптики и измерительной техники в последнее время тесно связано с лазерной интерферометрией, имеющей широкую сферу применений как в научном эксперименте, так и в промышленной технологии.

Эта ситуация напрямую связана с созданием лазерных источников излучения, обладающих высокой когерентностью, большой спектральной мощностью в узком частотном диапазоне и высокой направленностью. Такие источники излучения позволяют реализовать новые методы исследований различных сред и материалов. В настоящее время практически все радиотехнические методы могут быть реализованы и в оптическом диапазоне, т.е. в принципе ликвидировано качественное отличие оптики и радиоэлектроники и создано опто-электронное направление приборостроения. Подчеркнем, что малость длины волны лазерного излучения и возможность его широкой перестройки открывает ряд дополнительных перспектив в построении опто-электронных систем.

Применительно к задачам интерферометрии, наряду с традиционными измерениями линейных перемещений, включая сверхмалые перемещения, измерения расстояний, скоростей и вибраций, размеров, формы поверхностей и т.д., новые методы и высокотехнологичные материалы дали возможность создать и развивать методы лазерной интерферометрии для измерений с высокой точностью оптических свойств разных веществ, включая полупроводники, тонкие пленки, срезы биологических объектов, природные случайно-неоднородные среды, диффузно рассеивающие объекты, медленно меняющиеся во времени малые расстояния и т.д.

Именно таким исследованиям и посвящена рассматриваемая работа **Александра Д.В.**

В рассмотренной постановке тема представленной диссертации Александра Д.В. является актуальной и важной как для теоретических аспектов радиофизики и физики резонаторов, используемых при генерации лазерного излучения, так и для решения ряда прикладных задач, в том числе, для развития частотно-модулированной лазерной интерферометрии высокой точности. Эти методы основаны на использовании частотной модуляции излучения внешними относительно лазера отражателями и рассеивающими объектами, что позволяет исследовать спектрально-временные характеристики акустических и сейсмических колебаний в широком динамическом и временном диапазонах.

Содержание диссертационного исследования.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 116 страниц. Список цитируемой литературы содержит 98 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и защищаемые положения.

В главе 1 приведен исторический обзор классических методов интерферометрии. Отмечается, что новый импульс этим технологиям был дан в результате развития лазерных источников высокостабильного излучения в различных, и прежде всего, оптическом, диапазонах. Обсуждаются типы лазеров, используемых ныне в интерферометрических экспериментах, и обосновывается выбор газового лазера для проведения дальнейших исследований.

Во второй главе описывается принцип работы трехзеркального резонатора с обратной связью, предлагается метод расчета параметров (характеристик) резонатора, основанный на решении интегральных уравнениях. В качестве расчетной модели автор предложил резонатор с цилиндрическими зеркалами.

В ходе теоретических исследований режимов генерации лазера в таком резонаторе автором получены и проанализированы интегральные уравнения, описывающие электромагнитное поле в трехзеркальном резонаторе с цилиндрическими зеркалами. Выполнена проверка полученных результатов путем численного моделирования поведения собственных частот для некоторых простейших случаев трехзеркального лазерного резонатора. Полученные автором или при его непосредственном участии результаты показывают, что при увеличении связи лазера с внешней нагрузкой и увеличении длины внешнего резонатора наблюдаются области, в которых сдвиг частоты неоднозначен и может принимать два или три значения. Поведение частоты в этих областях становится неустойчивым, точность интерферометрических измерений на больших базах значительно ухудшается.

Проанализированы особенности работы двухволнового He-Ne лазера в режиме генерации на связанных переходах 3,39 мкм и 0,63 мкм. Так, в модели трехзеркального лазерного интерферометра была обнаружена нестабильная рабочая зона в режиме двухволновой генерации, которая затем наблюдалась экспериментально. Определены и экспериментально изучены оптимальные условия настройки лазера для обеспечения стабильной работы трехзеркального лазерного интерферометра.

3 глава посвящается изложению созданных автором методов регистрации интерференционной картины, наблюдаемой в трехзеркальном лазерном интерферометре-деформографе. Предложен метод линеаризации при цифровой обработке сигналов деформографа, для компенсации помехи от системы регистрации и увеличения динамического диапазона.

Предлагаемая система работает по схеме трехзеркального лазерного интерферометра, который имеет новый метод фазово-частотной модуляции (ФЧМ), основанный на суперпозиции двух независимых процессов модуляции. Автором были разработаны специальный алгоритм и создана программа для устранения скачков в интерферометрической записи из-за переключения в системе регистрации (смещение начала координат). Предложенный автором подход

позволяет увеличить линейность и разрядность полученных данных, тем самым целом повышая точность лазерного интерферометра.

В главе 4 приводятся и анализируются результаты исследований акустических и акусто-сейсмических процессов на экспериментальных установках с применением предложенных и разработанных методов. Наблюдения проводились на подземной лучевой линии ИРЭ на Котельникове РАН во Фрязино Московской области, на МЭС ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца» и в ИКИР ДВО РАН, Паратунка на Камчатке.

Проведены исследования и комплексные испытания опытных образцов лазерного интерферометра-деформера с использованием различных методов выделения интерференционных сигналов на полигонах в Москве (Фрязино) и Камчатке (Паратунка). Так, автором лично или при его непосредственном участии выполнены наблюдения процессов естественного и искусственного происхождения и непосредственно зарегистрированы различные сейсмические и геоакустические деформационные сигналы, например, от землетрясения в Мексике 08.09.2017. На основе выполненных измерений удалось выделить и проанализировать приход в область расположения деформографа объемных и поверхностных сейсмических волн.

В заключении подводятся основные итоги работы, из которых автором выделяются следующие :

Предложен новый метод интерферометрических измерений деформаций с методиками линеаризации и цифровой обработки для выполнения измерений в широком динамическом до 200 дБ диапазоне с ошибкой регистрации деформаций до 10^{-12} .

Для двумерной модели трехзеркального лазерного резонатора автором в квазиоптическом приближении сформулирована система интегральных уравнений, получены и исследованы ее решения.

С использованием созданной автором аппаратуры показана возможность сейсмо-деформационного и акустического мониторинга геодинимических процессов. Полученные результаты подтверждены в ходе сравнительных измерений разными методами и разными высокочувствительными пространственно-разнесенными приборами в сейсмо-энергоактивных зонах.

Диссертационная работа представляет собой в целом завершенное научное исследование. Работа достаточно четко структурирована, хорошо написана, содержит актуальную библиографию по рассмотренным проблемам. Приведенные результаты позволяют однозначно оценить собственный вклад автора. Для получения представленных экспериментальных данных использовалась современная аппаратура и апробированные методы измерений, результаты измерений в ряде случаев сравнивались с данными других научных групп и приборов. Объем и качество представленных научных материалов достаточен для обоснования сформулированных выше выводов, а интерпретация полученных результатов в целом представляется весьма **достоверной** и не противоречит известным физическим теориям и результатам других авторов.

К научной новизне работы можно отнести следующие основные результаты :

Автором предложена и рассмотрена двумерная модель трехзеркального лазерного резонатора, для которого в квазиоптическом приближении сформулирована система интегральных уравнений. На основе проведенного в работе анализа решений в ходе численных расчетов и экспериментального моделирования, обнаружены режимы нестабильной генерации в таком резонаторе и предложены способы стабилизации с помощью установления необходимых параметров обратной связи. Определены условия оптимальной настройки зеркал. Определены параметры обратной связи, необходимые для устойчивой работы в широком временном диапазоне.

Продемонстрирована возможность использования разработанного метода для интерферометрических измерений деформаций, вызванных искусственными сейсмоакустическими источниками, а также для выделения глобальных геофизических явлений.

Полученные результаты могут быть использованы для улучшения методов измерения и создания нового оборудования. Использование управляемого подвижного зеркала позволило разработать методы снижения паразитных эффектов отраженного излучения на пути луча от установленного оборудования и корректировки частоты лазера. В результате предложены рабочие методы повышения стабильности работы и точность трехзеркального интерферометра-деформографа, в котором используется обратное отражение для регистрации перемещений.

Результаты исследований деформационных процессов, полученные с использованием лазерных деформографов, могут, при дальнейшем развитии, служить индикаторами процессов, претворяющих или сопутствующих геодинамическим явлениям (тектоника, обвально-оползневых явлений, контроль состояния шахт, заглубленных объектов и т.п.).

Научная достоверность и новизна научных результатов подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах, обсуждениями на конференциях и семинарах, а также удовлетворительным согласием с результатами сравнения наблюдаемых эффектов с результатами других авторов и научных групп, использовавших другие приборы и принципы обработки.

Разные аспекты работы докладывались на многочисленных конференциях, широко и своевременно опубликованы - **по теме диссертации опубликовано 33 печатных изданиях, 13 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК и из списка рецензируемых WoS, 20 — в других изданиях и тезисах докладов.** Автор не только предложил усовершенствование методики определения изучаемых в работе параметров, но и сам участвовал в проведении экспериментов, создании и тестировании современного измерительного комплекса.

Содержание диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автореферат полностью и в целом адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Вместе с тем, к рассмотренной диссертационной работе можно высказать **ряд критических замечаний**.

1. Работа содержит опечатки, в основном орфографического и пунктуационного характера и не свободна от употребления ряда жаргонизмов.

2. В диссертации присутствует некоторая небрежность в оформлении.

Так, в ряде случаев оси амплитуд (см. например, рис. 14) не подписаны, причем иногда автор даже не дает подсказку для перевода отсчетов АЦП в реальные величины деформации. На рис. 31 надпись о 4-х часовой записи не совпадает с приводимыми временными отметками на шкале графика (менее 1 часа в общепринятой нотации).

В автореферате на рис. 1 приведена схема трехзеркального резонатора и описана его работа. Однако обозначения на рис. и в тексте для расстояний между зеркалами не совпадают. Примечательно, что в диссертации на стр.43 этот казус отсутствует.

3. Автор, для устранения скачков интерференционной картины при сканировании частоты, предлагает метод, основанный на задании фактической формы скачка в виде экспоненциальной формы. Однако в работе не приводятся результаты численного моделирования по проверки качества такой фильтрации и потому не ясна реальная точность предложенного алгоритма.

4. Практически не рассмотрены пути и способы дальнейшего повышения точности разработанного прибора, не ясно, как точности зависят (и зависят ли вообще) от величины базы интерферометра и времени наблюдения. В самом деле, хоть генерируемая мощность лазера и не очень большая, но долгосрочный мониторинг будет приводить к нагреву элементов интерферометра и изменению оптических характеристик канала. Следовательно, не ясно, какова стабильность точностных характеристик лазерного деформографа в режиме долговременного мониторинга.

5. Обсуждение предвестников и прогностических признаков землетрясений в сейсмоопасных районах, приведенное в работе, крайне важно для стран с сейсмоопасными регионами, но носит в работе в целом обзорный характер. Информативность и достоверность результатов долгосрочного и краткосрочного прогнозирования и наблюдений, могут быть обеспечены только комплексом самых разнообразных методов исследований, в том числе химических, измерений электрических полей, акустической эмиссии. При этом основными проблемами являются задачи отождествления источников, вызвавших регистрируемые колебания - собственно очаг землетрясения, атмосферный барический процесс, магнитосферно-ионосферное возмущения и. т.п. Работы в этом направлении еще далеки от разумного завершения, но представленные исследования вносят свой вклад в данную тематику.

Перечисленные замечания и недостатки в **целом не снижают общий высокий уровень** диссертации, но показывают ее актуальность и востребованность практикой мониторинга опасных геофизических явлений. Основные выводы и положения, выносимые на защиту, содержательны и достаточно для исследований такого рода обоснованы.

Материалы диссертации могут быть полезны широкому кругу специалистов, занимающихся научно-исследовательской работой в области физики лазеров и их применения для деформаций, в том числе и природных объектов на больших базах. Результаты могут быть использованы в ряде научных учреждений,

в частности, в ИКИР ДВО РАН, ТОИ ДВО РАН и других учреждениях РФ, коллективы которых занимаются исследованиями в указанных и смежных областях.

Итак, оценивая работу Александрова Д. В., можно утверждать, что **диссертация представляет собой законченное научное исследование и по объему результатов, достоверности, научной и практической значимости выводов удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Александров Д. В., безусловно заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.**

Официальный оппонент –
к. ф.-м. н., доцент кафедры физики атмосферы
Физического факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова
e-mail : zvi_555@list.ru или zakharov.vi@physics.msu.ru
тел. +7 915 0022144

Захаров В.И.

Декан Физического факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова, профессор

Сысоев Н.Н.